

مدل سازی و حل بهینه مسأله تخصیص و زمان بندی حسگر - سلاح/تهدید

به صورت یکپارچه با الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر GRASP

رضا قربانی صابر^۱، محمد رنجبر^{۲*}، سعید بلوچیان^۳، احمد ایزدی پور^۴

۱ - دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، ۲- دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه فردوسی مشهد،

ایران، ۳- دانشیار، گروه مهندسی برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد گناباد، ایران، ۴- استادیار، گروه مهندسی برق،

دانشگاه امام رضا (ع)، مشهد، ایران

(دریافت: ۹۷/۶/۱۴، پذیرش: ۹۸/۳/۲۸)

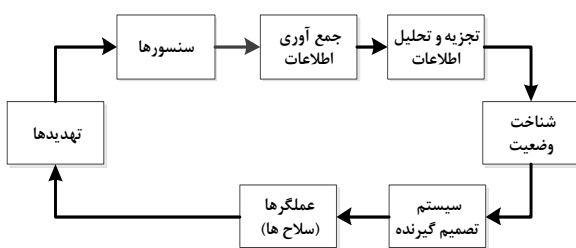
چکیده

امروزه در نبردها استفاده از سامانه‌های هوشمند بسیار متداول شده است. در همین راستا سلاح‌های هوشمند کاربرد فراوانی پیدا کرده‌اند که عمدتاً وابسته به حسگر هستند. تطابق حسگر با سلاح و تهدید یا به اختصار تخصیص حسگر-سلاح/تهدید یکی از چالش‌های صحنه نبرد و در زمره مسائل بهینه‌سازی تخصیص منابع پیچیده است به گونه‌ای که نتیجه نبردهای پیشرفته امروزه تا حد زیادی وابسته به استفاده هوشمندانه از حسگرها و سلاح‌های موجود برای افزایش تأثیر آنهاست. در این مقاله مسأله حسگر-سلاح/تهدید به صورت یکپارچه مدل سازی شده است. مدل ارائه شده به دنبال حداکثر نمودن تخریب تهدیدها در یک افق زمانی مشخص و با رعایت محدودیت‌های عملیاتی می‌باشد. برای حل مدل از نرم‌افزار CPLEX استفاده شده است. همچنین یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر GRASP برای حل مسأله توسعه داده شده است. در پایان، با استفاده از تعدادی نمونه مسأله که به صورت تصادفی ساخته شده‌اند، نتایج پیاده‌سازی کلیه روش‌ها ارائه و مقایسه شده‌اند.

کلیدواژه‌ها: تخصیص منابع، زمان بندی، حسگر - سلاح/تهدید

۱. مقدمه

در جنگ‌های مدرن، سامانه‌های هوشمند مدیریت نبرد^۱ دارای کاربردهای فراوانی هستند. این سامانه‌ها با توجه به اطلاعات ورودی وظیفه برنامه‌ریزی و کنترل نیروها و فرآیندها برای نابودی تهدیدها را بر عهده دارند. ورود اطلاعات درباره تهدیدهای موجود در میدان نبرد در این سامانه‌ها از طریق حسگرها انجام می‌شوند. سپس اطلاعات دریافت شده توسط حسگرها، پردازش شده و با توجه به منابع در اختیار سامانه، درباره چگونگی نابودی تهدیدها، تصمیم‌گیری می‌شود. شکل (۱) نشان دهنده معماری کلی سامانه مدیریت نبرد است. در بخش تصمیم‌گیری ممکن است مسائل مختلفی برای بهینه‌سازی مد نظر باشد یک دسته از این مسائل مسأله تخصیص و زمان بندی حسگر - سلاح/تهدید می‌باشد [۱].



شکل (۱): زیرسامانه‌های کلی سامانه مدیریت نبرد

مسأله تخصیص حسگر- سلاح/تهدید یکی از چالش‌های صحنه نبرد و در مجموعه مسائل بهینه‌سازی تخصیص منابع پیچیده است، به گونه‌ای که نتیجه نبردهای پیشرفته امروزه تا حد زیادی وابسته به استفاده هوشمندانه از حسگرها و سلاح‌های موجود برای افزایش تأثیر آنهاست [۲]. با توجه به اهمیت حسگرها و محدودیت‌هایی که توسط آنها به تصمیم‌گیری در صحنه نبرد دیکته می‌شود، مسأله تخصیص حسگر-سلاح/تهدید به دو گروه وابسته و غیر وابسته دسته‌بندی می‌شود. در صورتی که

* رایانامه نویسنده پاسخگو: m_ranjbar@um.ac.ir

مسائل به صورت کلی به دو دسته خودی مبنا^۲ و هدف مبنا^۳ تقسیم می‌شوند. در دسته اول معمولاً تابع هدف کمینه‌سازی تخریب وارد شده به تجهیزات دفاعی در نظر گرفته شده است و در دسته دوم اکثراً تابع هدف بیشینه‌سازی تخریب تهدیدها در نظر گرفته شده است [۴]. از نظر تابع هدف می‌توان تحقیقات انجام‌شده در این بخش را به سه دسته تقسیم نمود. دسته اول به دنبال کاهش احتمال سالم‌ماندن تهدیدها یا به عبارتی بیشینه‌سازی احتمال نابودی آنها هستند که این توابع هدف از جنس امید ریاضی می‌باشند. دسته دوم توابع هدفی هستند که آسیب‌های وارده بر تجهیزات دفاعی را کمینه می‌کنند و دسته سوم احتمال نجات تجهیزات دفاعی را حداکثر می‌سازند که در این دسته نیز توابع هدف از جنس امید ریاضی می‌باشند [۵]. در پژوهش انجام‌شده توسط حسین و همکارانش [۶]، تحقیقات مربوط به بخش تخصیص سلاح به تهدید را به دو دسته کلی ایستا و پویا نیز دسته‌بندی نمود. در حالت ایستا مسئله فقط در یک دوره از زمان مورد بررسی قرار می‌گیرد. اما در حالت پویا چند دوره زمانی وجود دارد که در ابتدای هر دوره، از اطلاعات به دست آمده از دوره قبل در حل مسئله استفاده می‌شود. لوید و ویتنسهاوزن [۷]، در تحقیقی اثبات کردند که مسئله تخصیص سلاح به تهدید از نوع مسائل NP-Complete می‌باشد. کیم و چا [۸]، مدل‌سازی مسئله زمان‌بندی شلیک سلاح‌ها با معیار کمینه‌سازی احتمال مورد حمله قرار گرفتن از سوی اهداف مهاجم را انجام دادند. لوتر و همکاران [۹] به بررسی مسئله به صورت دو هدفه با توابع هدف بیشینه‌سازی احتمال نابودی تهدیدها و کمینه‌سازی هزینه دفاع در مقابل تهدیدها، پرداخت از تحقیقاتی که به روش‌های حل دقیق برای مسئله تخصیص سلاح به تهدید انجام شده است به پژوهش انجام‌شده توسط آهوجا و همکارانش [۵] می‌توان اشاره کرد که در آن از یک روش شاخه و کران برای حل مسئله استفاده کردند. کاراساکال [۱۰] به صورت خاص بر روی دفاع در مقابل تهدیدهای هوایی در یک نبرد دریایی پرداخت و رویه‌ای برای یافتن جواب بهینه ارائه داد. در سال ۲۰۰۷ هم گولز و همکارانش [۱۱] به توسعه تحقیق قبلی پرداختند.

چو [۱۲]، مسئله را با هدف کمینه‌سازی میانگین خسارت واردشده بر تجهیزات دفاعی، مدل‌سازی نمود و برای حل آن از ترکیب دو روش جستجوی حریصانه برای ساخت جواب اولیه و یک روش ابتکاری دیگر برای جستجوی فضای حل مسئله استفاده کرد. توران [۱۳]، چند الگوریتم برای حل مسئله در حالت ایستا و با دو نوع تابع هدف خودی مبنا و هدف مبنا ارائه داد. کالیانام و

در یک تخصیص انجام شده با ثابت ماندن سلاح و تهدید، حسگر تغییر کند و در نتیجه بهره به دست آمده از تخصیص تغییر یابد، آنگاه مسئله تخصیص سلاح به تهدید به تخصیص حسگر به تهدید وابسته می‌شود و در غیراینصورت مسئله تخصیص حسگر-سلاح/تهدید به صورت غیروابسته است. بنابراین، در وضعیت تخصیص حسگر-سلاح/تهدید وابسته حل مسئله تخصیص سلاح به تهدیدها بدون توجه به تخصیص حسگر به تهدید کارایی کمتری خواهد داشت [۲].

در پژوهش‌های گذشته از مسئله تخصیص حسگر-سلاح/تهدید غیر وابسته به عنوان تخصیص سلاح به هدف^۱ نام برده شده است و تحقیقات زیادی روی آن تا به امروز انجام شده است اما مسئله تخصیص حسگر-سلاح/تهدید وابسته که شکل کلی‌تر مسئله است و در آن میزان بهره تخصیص سلاح به تهدید وابسته به تخصیص حسگر به تهدید می‌باشد، سابقه کمی در پژوهش‌های نظامی دارد [۳].

در ادامه این مقاله، در بخش دوم به بررسی سوابق پژوهشی موضوع مورد بحث پرداخته می‌شود، سپس شکاف تحقیقاتی بین پژوهش‌های گذشته و تحقیق حاضر، بیان خواهد شد. در بخش سوم جزئیات مدل ریاضی و شرح آن ارائه می‌شود، در بخش چهارم روش فراابتکاری برای حل مسئله تشریح خواهد شد و در بخش پنجم به بررسی نتایج حاصل از پیاده‌سازی مدل بر روی نمونه مسائل ساخته شده می‌پردازیم. در بخش ششم نیز یک مثال عددی از مسئله بیان و حل خواهد شد. در بخش پایانی نیز به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری خواهیم پرداخت.

۲. مرور ادبیات

در این بخش توضیحی درباره پژوهش‌هایی که در گذشته در زمینه تخصیص سلاح‌های هوشمند به اهداف صورت گرفته، ارائه می‌گردد.

سابقه پژوهش در این زمینه به دو بخش تقسیم می‌شود. بخش اول مربوط به مسئله تخصیص سلاح به تهدید است. در این بخش حسگرها در نظر گرفته نشده است اما در بخش دوم حسگر نیز به مسئله تخصیص اضافه شده است و مسئله تخصیص حسگر، سلاح و تهدید به صورت همزمان در نظر گرفته شده است.

۲-۱. سوابق پژوهشی مسئله تخصیص سلاح به تهدید

در بخش اول یعنی تحقیقات مربوط به مسئله تخصیص سلاح به تهدید (تخصیص حسگر-سلاح/تهدید به صورت غیروابسته)

2- Asset Based
3- Target Based

1- Weapon-Target Assignment (WTA)

مقایسه‌های بزرگ با توجه به ظهور مفهوم جنگ شبکه محور^۳، بررسی شده است و مشخص شد که الگوریتم پیشنهادی دارای عملکرد مناسب حتی در مقیاس‌های بزرگ می‌باشد [۲۲]. در تحقیقی که توسط اخروی و همکاران [۲۳] انجام شده است، مسأله تخصیص سلاح به اهداف با توجه به طبقه‌بندی اهداف از منظر میزان تهدیدآمیز بودن با توجه به معیارهای متفاوت بررسی شد. در این تحقیق با در نظر گرفتن رتبه‌بندی وارزیابی اهداف مهاجم مقرهای خودی و ریسک درگیری میان آنها، سناریوهای مختلفی برای صحنه نبرد پیشنهاد می‌دهد که در نهایت بهترین سناریو با استفاده از یک مدل تخصیص انتخاب می‌گردد. در پژوهشی دیگر این مسأله با در نظر گرفتن تابع احتمال اصابت موکش و شنواری ناو در دریا بررسی شده است [۲۴].

۲-۲. سوابق پژوهشی مسأله تخصیص حسگر-سلاح/تهدید وابسته

در بخش دوم یعنی تحقیقات مربوط به تخصیص حسگر، سلاح و تهدید به صورت وابسته که بیشتر مرتبط با موضوع تحقیق حاضر است تحقیقات محدودتری انجام شده است که در ادامه به بررسی این تحقیقات پرداخته می‌شود.

بگدانوویچ و کولمن [۲۵] مسأله جفت‌کردن سلاح به تهدید و حسگر به تهدید را به عنوان یک مسأله تخصیص در نظر گرفتند و با هدف بهینه‌سازی اثربخشی تخصیص با استفاده از الگوریتم حراج^۴ به حل آن پرداختند. در تحقیق دیگری که در سال ۲۰۰۸ توسط همین افراد صورت گرفت مسأله تخصیص حسگر-سلاح/تهدید را به صورت یکپارچه فرموله نمودند. از فرضیات این پژوهش این بود که حسگرها، سلاح‌ها و تهدیدها در هر لحظه از زمان می‌توانند جایجا شده و مکان آنها در هر لحظه قابل پیش‌بینی است. همچنین در مدل تخصیص ارائه شده سود حاصل از تخصیص یک سه تایی مرتب حسگر-سلاح-تهدید به صورت یکپارچه وابسته به هر سه عامل در نظر گرفته شد. با توجه به این فرضیات الگوریتمی در این پژوهش ارائه شد که در هر لحظه از زمان با توجه به پیش‌بینی صورت گرفته از مکان حسگرها، سلاح‌ها و تهدیدها مدل مسأله با استفاده از الگوریتم حراج حل می‌شود و این کار به ازای تمام لحظات در نظر گرفته شده تکرار می‌شود [۲]. در سال ۲۰۰۹ نیز بگدانوویچ پارامترهای مختلف در تخصیص حسگر، سلاح و تهدید را با استفاده از تابع سود حاصل از تخصیص در نظر گرفت و مدل ارائه شده در تحقیقات قبلی را بهبود داد و مجدداً با استفاده از الگوریتم حراج

همکارانش [۱۴] مسأله تخصیص سلاح به تهدید را با فرض اینکه به سمت تهدیدها شلیک‌های پی‌درپی انجام می‌شود، بررسی نمودند. هدف در آن تحقیق این بود که با توجه به نتیجه به دست آمده از هر شلیک به سمت یک تهدید، آیا لازم است شلیک ادامه پیدا کند یا خیر. همچنین در تحقیق صورت گرفته توسط می و همکاران [۱۵] مسأله به صورت پویا و با در نظر گرفتن بازه‌های زمانی، بررسی شد. چانگ و همکاران [۱۶]، مسأله را در نبردهای هوایی بررسی کردند و با استفاده از روش ترکیبی یک الگوریتم فراابتکاری به نام ازدحام ماهی‌ها^۱ و یک روش ابتکاری برای جستجوی محلی به حل مسأله پرداختند. در تحقیق دیگری که توسط لی و همکاران [۱۷] انجام شد مسأله تخصیص سلاح به تهدید با دو هدف بهینه‌سازی میانگین تخریب تهدیدها و کمینه‌سازی هزینه استفاده از تسلیحات، بررسی شد و برای حل آن روشی مبتنی بر الگوریتم فراابتکاری کلونی مورچگان^۲ ارائه گشت.

تقوی و رنجبر [۱۸] مدلی ساده برای زمان‌بندی سلاح‌ها برای دفاع در مقابل حملات دشمن ارائه دادند و برای حل آن نیز از یک روش شاخه و کران استفاده نمودند. از دیگر کارهای مهم انجام شده در این زمینه می‌توان به پژوهش‌هایی که در سال ۱۳۹۷ توسط پیمان‌کار و همکاران [۱۹] انجام شد اشاره نمود. آنها در مقاله‌ای، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی برای مسئله چیدمان پایگاه‌های آتش با هدف بهینه‌سازی متوسط میزان دسترسی به اهداف و میزان محافظت از مناطق راهبردی ارائه دادند. همچنین دو الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات برای حل این مسئله طراحی شده است. سپس همان محققین در مقاله‌ای دیگر با فرض مشخص بودن محل پایگاه‌های آتش، به ارائه یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی برای مسئله تخصیص و زمان‌بندی سلاح‌های یک مجموعه پایگاه آتش به یک مجموعه از اهداف مهاجم پرداختند. هدف آنها بهینه‌سازی متوسط میزان تخریب اهداف مهاجم و میزان محافظت از یک مجموعه مناطق راهبردی و استفاده کارا از سلاح‌های موجود با در نظر گرفتن محدودیت‌های عملیاتی بوده است [۲۰]. در تحقیق خاتون‌آبادی و شیرازی [۲۱] تخصیص سلاح به اهداف با کمک روش بهینه‌سازی محدودیت توزیع شده بررسی شد. برای حل مدل محدودیت توزیع شده از الگوریتمی به نام بهینه‌سازی توزیع شده غیرهمزمان استفاده شده است. در پژوهش دیگری حل مسأله تخصیص سلاح به هدف با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات برای استفاده در

3- Network Centric Warfare

4- Auction algorithm

1- Artificial Fish Swarm Algorithm (AFSA)

2- Ant Colony algorithm

آنچه در واقعیت اتفاق می‌افتد همخوانی ندارد. در این تحقیق نحوه تأثیرگذاری حسگرها در مدل‌سازی و برای به‌دست‌آوردن جواب مسأله در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر از دیدگاه طرح مسأله، نوآوری در مدل‌سازی و حل دو مسأله بهینه‌سازی به ظاهر جداگانه که توسط قیدها به هم مرتبط شده‌اند و هرگونه تغییر در پاسخ مسأله حسگر/ تهدید تأثیر در مسأله سلاح/ تهدید دارد و برعکس، وجود دارد.

علاوه بر این در تحقیقات قبلی بسیاری از قابلیت‌ها و محدودیت‌هایی که در استفاده از سلاح‌ها و حسگرهای مختلف وجود دارد در نظر گرفته نشده است که در این تحقیق با استفاده از پارامترهایی نظیر دقت سلاح‌ها، زمان ردیابی حسگرها، برد و زوایای پوشش حسگرها و سلاح‌ها، سعی شده است که مسأله به آنچه در دنیای واقعی اتفاق می‌افتد نزدیک‌تر باشد. همچنین یکی از فرضیات مسأله، متحرک بودن تهدیدهاست که این موضوع سبب می‌شود با توجه به موقعیت تهدیدها در هر لحظه از زمان تخصیص مناسب صورت گیرد. بنابراین، برنامه‌ریزی جهت تخصیص حسگر-سلاح/ تهدید باید در یک افق زمانی انجام شود. در حقیقت برخلاف بسیاری از پژوهش‌های گذشته که مسأله را به‌صورت تک‌مرحله‌ای در نظر گرفته‌اند، در این تحقیق مدل‌سازی به‌گونه‌ای انجام شده است که در هر لحظه از زمان با استفاده از اطلاعات به‌دست آمده تا آن لحظه می‌توان برنامه‌ریزی را تا پایان افق زمانی، انجام داد.

۳. مدل ریاضی

در این مسأله فرض می‌شود تعدادی حسگر، سلاح و تهدید در اختیار است. می‌خواهیم بهترین تخصیص حسگر-سلاح-تهدید جهت نابودی تهدیدها را انتخاب کنیم. این تخصیص در یک افق برنامه‌ریزی انجام می‌شود. حسگرها هر یک ممکن است تمامی تهدیدها یا تعدادی از آنها را رصد نمایند بنابراین در حالت کلی با وضعیت تخصیص حسگر-سلاح/تهدید وابسته مواجه هستیم و نکات حائز اهمیت در این مسأله عبارتند از:

- پیشینه نابودی ممکن برای تهدیدها به‌دست بیاید.
- هر یک از سلاح‌ها در یک مکان مشخص، ثابت است.
- ممکن است تعدادی از حسگرها و تهدیدها متحرک باشند.
- اگر سلاح تخصیص داده شده به تهدید، هوشمند باشد معمولاً با شلیک رگباری و استفاده از قابلیت‌های حسگرهای خود تا نابودی هدف مورد نظر پیش می‌رود.
- حسگرها در تشخیص اهداف، عدم قطعیت‌های (ضریب دقت‌های) متفاوتی دارند.

به حل مسأله پرداخت [۳]. زیفن و همکارانش [۲۶]، مسأله را با بهبود الگوریتم معرفی‌شده در تحقیق قبلی، بر مبنای الگوریتم حراج حل نمودند. چن و همکاران [۲۷] نیز مسأله تخصیص حسگر-سلاح-تهدید را بر مبنای پیشینه‌سازی سود حاصل از تخصیص حسگر به سلاح و تهدید مدل‌سازی نمودند و آن را با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات^۱ حل نمودند. در این پژوهش فرض شده بود که به هر حسگر دقیقاً باید یک تهدید و یک سلاح تخصیص یابد. همچنین به هر سلاح حداکثر به اندازه ظرفیت آن سلاح می‌تواند حسگر و تهدید تخصیص یابد و به هر تهدید نیز دقیقاً به اندازه‌ای که از قبل مشخص است، حسگر و سلاح تخصیص یابد. در سال ۲۰۱۶ در تحقیقی که توسط لی و همکاران [۱] صورت گرفت برای طراحی یک سامانه کنترل در میدان جنگ مسأله تخصیص سلاح به تهدیدها با در نظر گرفتن حسگرها به عنوان عامل‌های ردیابی تهدیدها، در نظر گرفته شد و حل مسأله با استفاده از الگوریتم ژنتیک^۲ انجام شد. ازرا و همکاران [۲۸] در تحقیقی در زمینه فرموله کردن مسأله تخصیص حسگر-سلاح/تهدید به‌صورت یکپارچه انجام دادند. در این پژوهش ابتدا ویژگی‌های دو زیرمسأله تخصیص سلاح به تهدید و حسگر به تهدید به‌صورت جداگانه بررسی شدند و سپس مدلی برای در نظر گرفتن دو مسأله به‌صورت یکپارچه ارائه شد. در مدل‌سازی ارائه‌شده جزئیات بیشتری نسبت به تحقیقات قبلی در نظر گرفته شده بود. از جمله این جزئیات می‌توان به اضافه‌شدن پارامترهایی مانند میزان موجودی مهمات و ضریب دقت سلاح‌ها، اشاره نمود. مو و همکارانش [۲۹] در تحقیقی مسأله تخصیص حسگر-سلاح/تهدید را مدل‌سازی و حل کردند. در این تحقیق پارامترهایی مانند احتمال ردیابی تهدید برای حسگرها و احتمال نابودکردن تهدید برای سلاح‌ها در نظر گرفته شد. همچنین از فرضیات این پژوهش این بود که حسگر و سلاح‌ها از قبل به هم تخصیص یافته‌اند و کافی است که هر زوج حسگر-سلاح به یک تهدید تخصیص یابد. مسأله تخصیص حاصل با یک روش فراابتکاری الهام گرفته‌شده از فیزیک کوانتوم حل شد.

در اکثر تحقیقات قبلی اگرچه حسگرها و سلاح‌ها به‌ظاهر به‌صورت هم‌زمان در مدل‌سازی حضور داشتند، اما در این تحقیقات در واقع هر جفت از حسگرها و سلاح‌ها با هدف پیشینه‌سازی بهره حاصل، به یک تهدید تخصیص می‌یابند و به این معناست که از قبل سود حاصل از تخصیص مشخص است و نحوه اثرگذاری حسگرها بر سلاح‌ها برای افزایش میزان دقت آنها از قبل باید توسط تصمیم‌گیرنده مشخص شود که این موضوع با

پارامترهای ورودی مسأله به شرح زیر می‌باشند.

1 - Particle Swarm Optimization (PSO)

2 - Genetic Algorithm

	طول جغرافیایی (درجه)		مجموعه‌ها:
α_{st}	ارتفاع حرکت حسگر S در لحظه t (km)	$w \in W$	مجموعه سلاح‌ها
θ'_s	زاویه ارتفاع بردار حرکت عمودی حسگر S (درجه)	$s \in S$	مجموعه حسگرها
dis_{wht}	فاصله سلاح W از تهدید h در لحظه t (km)	$h \in H$	مجموعه تهدیدها
δ_{sht}	فاصله حسگر S از تهدید h در لحظه t (km)	$t \in T$	مجموعه بازه زمانی با اندیس t (S)
r_{wm}^{\min}	کمینه برد موشک m از سلاح W (km)	$m \in M_w$	مجموعه موشک‌های سلاح W
r_{wm}^{\max}	بیشینه برد موشک m از سلاح W (km)		پارامترها:
η_{wm}	زاویه پوشش افقی موشک m از سلاح W (درجه)	o_s	حداکثر تعداد تهدیدی که توسط حسگر S بصورت همزمان قابل ردیابی است.
η'_{wm}	زاویه پوشش عمودی موشک m از سلاح W (درجه)	dt_{sh}	مدت زمان لازم جهت تشخیص تهدید h توسط حسگر S (S)
c_s^{\min}	کمینه میزان پوشش حسگر S (km)	p_{sht}	ضریب دقت حسگر S جهت تشخیص تهدید h در زمان t ($p_{sht} \in [0,1]$)
c_s^{\max}	بیشینه میزان پوشش حسگر S (km)	b_h	ضریب اهمیت تهدید h ($b_h \in [0,1]$)
γ_s	زاویه پوشش افقی حسگر S (درجه)	π_{wm}	ضریب دقت موشک m از سلاح W
γ'_s	زاویه پوشش عمودی حسگر S (درجه)	d_{wmh}	متوسط میزان تخریب تهدید h اگر با موشک m از سلاح W به آن شلیک شود
λ	بیشینه تعداد حسگری که می‌توانند همزمان یک تهدید را ردیابی کنند	st_w	مدت زمان آماده‌سازی سلاح W (S)
l_h	وزن تهدید h (kg)	ft_w	مدت زمان شلیک سلاح W (S)
e_h	میزان نابودی تهدید h	x_w	طول جغرافیایی سلاح W (درجه)
G	یک عدد خیلی بزرگ	y_w	عرض جغرافیایی سلاح W (درجه)
	متغیرهای تصمیم:	χ_{ht}	طول جغرافیایی تهدید h در زمان t (درجه)
A_{ht}	متوسط میزان تخریب برای تهدید h در زمان t	ψ_{ht}	عرض جغرافیایی تهدید h در زمان t (درجه)
$U_{wmhstt'}$	متغیر باینری، برابر با یک اگر موشک m از سلاح W به تهدید h در زمان شلیک کند در حالی که ردیابی این تهدید توسط حسگر S در زمان t' شروع شده باشد و در غیراینصورت برابر با صفر	lo_{st}	طول جغرافیایی حسگر S در زمان t (درجه)
V_{sht}	متغیر باینری، برابر با یک اگر ردیابی تهدید h در لحظه t توسط حسگر S شروع شود	la_{st}	عرض جغرافیایی حسگر S در زمان t (درجه)
	در ادامه مدل زمان‌بندی و تخصیص حسگر-سلاح/تهدید به صورت یکپارچه آمده است.	φ_{wm}	زاویه بین تصویربردار جهت قرارگیری موشک m از سلاح W با محور طول جغرافیایی (درجه)
		φ'_{wm}	زاویه ارتفاع موشک m از سلاح W (درجه)
		a_{ht}	ارتفاع حرکت تهدید h در لحظه t (km)
		θ_s	زاویه بین تصویربردار حرکت حسگر S با محور

$Max F = \sum_{h \in H} b_h \sum_{t \in T} A_{ht}$		(۱)
$A_{ht} \leq \sum_{s \in S} \sum_{t'=0}^{t-dt_{sh}} p_{sht'} \sum_{w \in W} \sum_{m \in M_w} \pi_{wm} \times d_{wmh} \times (1 - 0.2 \left(\frac{dis_{wht} - r_{wm}^{\min}}{r_{wm}^{\max} - r_{wm}^{\min}} \right)) \times \frac{3500}{l_h} \times U_{wmhstt'}$	$; \forall h \in H, t \in T$	(۲)
$\sum_{t \in T} A_{ht} \leq (1 - e_h)$	$; \forall h \in H$	(۳)
$\sum_{t''=t'+1}^{t+ft_w} V_{sht''} \leq G(1 - U_{wmhstt'})$	$; \forall w \in W, \forall m \in M_w, \forall h \in H, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall t' \leq t - dt_{sh}$	(۴)
$\sum_{\substack{h' \in H \\ h' \neq h}} \sum_{t''=t'}^{t+ft_w} V_{sht''} \leq G(1 - U_{wmhstt'}) + O_s - 1$	$; \forall w \in W, \forall m \in M_w, \forall h \in H, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall t' \leq t - dt_{sh}$	(۵)
$\sum_{\substack{s' \in S \\ s' \neq s}} \sum_{t''=t'}^{t+ft_w} V_{sht''} \leq G(1 - U_{wmhstt'}) + \lambda - 1$	$; \forall w \in W, \forall m \in M_w, \forall h \in H, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall t' \leq t - dt_{sh}$	(۶)
$V_{sht'} \leq \sum_{w \in W} \sum_{m \in M_w} \sum_{t' \geq t+dt_{sh}} U_{wmhstt'}$	$; \forall h \in H, \forall s \in S, \forall t' \in T$	(۷)
$\sum_{w \in W} \sum_{m \in M_w} \sum_{t' \geq t+dt_{sh}} U_{wmhstt'} \leq G(V_{sht'})$	$; \forall h \in H, \forall s \in S, \forall t' \in T$	(۸)
$U_{wmhstt'} = 0$	$; \forall w \in W, \forall m \in M_w, \forall h \in H, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall t' > t - dt_{sh}$	(۹)
$U_{wmhstt'} < 1 + (1 - e_h) - \sum_{t' < t} A_{ht'}$	$; \forall w \in W, \forall m \in M_w, \forall h \in H, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall t' \leq t - dt_{sh}$	(۱۰)
$\sum_{h \in H} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} \sum_{t'=0}^{t-dt_{sh}} U_{wmhstt'} \leq 1$	$; \forall w \in W, \forall m \in M_w$	(۱۱)
$\sum_{m \in M_w} \sum_{h \in H} \sum_{s \in S} \sum_{t'=0}^{t-dt_{sh}} U_{wmhstt'} \leq 1$	$; \forall w \in W, \forall t \in T$	(۱۲)
$\sum_{m \in M_w} \sum_{\substack{h' \in H \\ h' \neq h}} \sum_{s \in S} \sum_{t''=t'+1}^{t+ft_w+st_w} \sum_{t'=0}^{t''-dt_{sh}} U_{wmhst''t'} \leq G(1 - \sum_{m \in M_w} \sum_{s \in S} \sum_{t'=0}^{t-dt_{sh}} U_{wmhstt'})$	$; \forall w \in W, \forall t \in \{1, \dots, T - ft_w - st_w\}, \forall h \in H$	(۱۳)
$\sum_{m \in M_w} \sum_{s \in S} \sum_{t''=t'+1}^{t+ft_w} \sum_{t'=0}^{t''-dt_{sh}} U_{wmhst''t'} \leq G(1 - \sum_{m \in M_w} \sum_{s \in S} \sum_{t'=0}^{t-dt_{sh}} U_{wmhstt'})$	$; \forall w \in W, \forall t \in \{1, \dots, T - ft_w\}, \forall h \in H$	(۱۴)
$c_s^{\max} - \delta_{sht''} \geq G(U_{wmhstt'} - 1)$	$; \forall w \in W, \forall m \in M_w, \forall h \in H, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall t' \leq t - dt_{sh}, t'' \in \{t', \dots, t + ft_w\}$	(۱۵)
$\delta_{sht''} - c_s^{\min} \geq G(U_{wmhstt'} - 1)$	$; \forall w \in W, \forall m \in M_w, \forall h \in H, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall t' \leq t - dt_{sh}, t'' \in \{t', \dots, t + ft_w\}$	(۱۶)
$r_{wm}^{\max} - dis_{wht} \geq G(U_{wmhstt'} - 1)$	$; \forall w \in W, \forall m \in M_w, \forall h \in H, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall t' \leq t - dt_{sh}$	(۱۷)
$dis_{wht} - r_{wm}^{\min} \geq G(U_{wmhstt'} - 1)$	$; \forall w \in W, \forall m \in M_w, \forall h \in H, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall t' \leq t - dt_{sh}$	(۱۸)

$\frac{\gamma_s}{2} - \left \tan^{-1} \left(\frac{\psi_{ht''} - \alpha_{st''}}{\chi_{ht''} - \alpha_{st''}} \right) - \theta_s \right \geq G(U_{wmhstt'} - 1)$	$; \forall w \in W, \forall m \in M_w, \forall h \in H, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall t' \leq t - dt_{sh}, t'' \in \{t', \dots, t + ft_w\}$	(۱۹)
$\frac{\gamma'_s}{2} - \left \tan^{-1} \left(\frac{\alpha_{ht''} - \alpha_{st''}}{\frac{R\pi\chi_{ht''}}{180} - \frac{R\pi\alpha_{st''}}{180}} \right) - \theta'_s \right \geq G(U_{wmhstt'} - 1)$	$; \forall w \in W, \forall m \in M_w, \forall h \in H, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall t' \leq t - dt_{sh}, t'' \in \{t', \dots, t + ft_w\}$	(۲۰)
$\frac{\eta_{wm}}{2} - \left \tan^{-1} \left(\frac{\psi_{ht} - \gamma_w}{\chi_{ht} - x_w} \right) - \phi_{wm} \right \geq G(U_{wmhstt'} - 1)$	$; \forall w \in W, \forall m \in M_w, \forall h \in H, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall t' \leq t - dt_{sh}$	(۲۱)
$\frac{\eta'_{wm}}{2} - \left \tan^{-1} \left(\frac{\alpha_{ht} - 0}{\frac{R\pi\chi_{ht}}{180} - \frac{R\pi x_w}{180}} \right) - \phi'_{wm} \right \geq G(U_{wmhstt'} - 1)$	$; \forall w \in W, \forall m \in M_w, \forall h \in H, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall t' \leq t - dt_{sh}$	(۲۲)
$U_{wmhstt'} \in \{0, 1\}$	$; \forall w \in W, \forall m \in M_w, \forall h \in H, \forall s \in S, \forall t \in T, \forall t' \leq t - dt_{sh}$	(۲۳)
$A_{ht} \geq 0$	$; \forall h \in H, \forall t \in T$	(۲۴)
$V_{sht} \in \{0, 1\}$	$; \forall h \in H, \forall s \in S, \forall t \in T$	(۲۵)

می‌کند که هر موشک حداکثر یک بار می‌تواند شلیک شود. محدودیت (۱۲) تضمین می‌کند که در هر لحظه یک سلاح حداکثر یک شلیک می‌تواند انجام دهد. محدودیت (۱۳) مربوط به زمان آماده‌سازی سلاح می‌باشد و طبق آن در صورتی که سلاح w به تهدید h در زمان t شلیک کند، آن سلاح در بازه زمانی $\{t, \dots, t + ft_w + st_w\}$ نمی‌تواند تهدید دیگری را مورد هدف قرار دهد. همچنین محدودیت (۱۴) نیز به صورت مشابه بیانگر این است که در صورتی که سلاح w به تهدید h در زمان t شلیک کند، در صورتی می‌تواند مجدداً به همان تهدید شلیک کند که به اندازه زمان شلیک سلاح یا همان ft_w از شروع شلیک قبلی گذشته باشد. محدودیت‌های (۱۵) و (۱۶) مربوط به کمینه و بیشینه برد حسگرها در ردیابی تهدیدها هستند و بیان می‌کنند که یک حسگر در صورتی می‌تواند تهدیدی را مورد ردیابی قرار دهد که مقدار فاصله آن تهدید از حسگر از لحظه شروع ردیابی تا پایان آن بین کمینه و بیشینه پوشش حسگر قرار داشته باشد. محدودیت‌های (۱۷) و (۱۸) نیز به صورت مشابه بیان‌کننده حداقل و حداکثر برد یک سلاح هستند. محدودیت‌های (۱۹) تا (۲۲) مربوط به زوایای پوشش افقی و عمودی حسگرها و سلاح‌ها هستند. محدودیت‌های (۲۳) تا (۲۵) نیز بیان‌کننده نوع متغیرهای تصمیم به کاررفته در مدل را نشان می‌دهند.

در این مدل، تابع هدف (۱) بیانگر بیشینه‌سازی متوسط میزان تخریب به دست آمده برای تهدیدها براساس میزان اهمیت هر تهدید می‌باشد. در محدودیت (۲) عبارت سمت راست محدودیت، برآوردی از متوسط میزان تخریب به وجود آمده برای تهدید h که وابسته به پارامترهای متوسط میزان تخریب و دقت سلاح‌ها، دقت حسگرها، فاصله و وزن تهدید نسبت به سبک‌ترین تهدیدها (۳۵۰۰ کیلوگرم)، می‌باشد.

محدودیت (۳) تضمین می‌کند که مجموع میزان تخریب تهدید h در افق برنامه‌ریزی مورد نظر از میزان بخش‌های نابود نشده‌ی این تهدید بیشتر نشود. محدودیت (۴) بیان می‌کند که یک حسگر در طول زمان ردیابی و تا پایان زمان شلیک به یک تهدید، یک بار به آن تهدید می‌تواند تخصیص یابد. محدودیت (۵) تضمین‌کننده این موضوع است که در هر لحظه هر حسگر بیشتر از ظرفیت خود مورد استفاده قرار نگیرد. به صورت مشابه محدودیت (۶) نیز باعث می‌شود هر تهدید در هر لحظه بیشینه توسط λ حسگر مورد ردیابی قرار گیرد. محدودیت‌های (۷) و (۸) رابطه بین دو متغیر تصمیم را بیان می‌کند. محدودیت‌های (۹) بیان می‌کند که فاصله زمانی بین شروع ردیابی تا شروع زمان شلیک حداقل باید به اندازه dt_{sh} باشد. محدودیت (۱۰) از تخصیص‌های بی‌پهلو جلوگیری می‌کند. محدودیت (۱۱) تضمین

موجود در RCL، یک عنصر به تصادف انتخاب شده و به جواب مسئله اضافه می‌شود و این رویه تا جایی ادامه پیدا می‌کند که دیگر نتوان عنصری را به جواب مسئله اضافه نمود. از ویژگی‌های خاص الگوریتم GRASP می‌توان به آسانی و پیچیدگی کم آن برای پیاده‌سازی اشاره کرد [۳۰]. با توجه به محدودیت‌های زیاد و پیچیده مسئله تحت بررسی در این تحقیق، استفاده از الگوریتم‌های جمعیت مینا مانند ژنتیک و سایر الگوریتم‌های متداول مانند جستجوی ممنوعه باعث افزایش پیچیدگی محاسباتی و زمان حل می‌شود. بنابراین، از الگوریتم GRASP که دارای پیچیدگی محاسباتی کمی است، استفاده شده است.

در شکل (۲) شبه کد الگوریتم GRASP آورده شده است. این الگوریتم یک نمونه مسئله را به عنوان ورودی می‌گیرد. همچنین شرط خاتمه، دیگر ورودی این الگوریتم است که هم تعداد تکراری خاص، هم محدودیت زمانی و یا هر دو شرط می‌توانند به عنوان شرط خاتمه در نظر گرفته شوند. همچنین تابع fitness نیز تابع برازش جواب در هر تکرار است که در این مسئله سود حاصل از تخریب تهدیدها، تابع برازش است که قصد پیشینه‌سازی آن را داریم.

Procedure GRASP

```

1: while (GRASP Stop Condition not met)
2:   solution
   ← Construct_Greedy_Randomized_Solution
3:   solution ← Local_Search(solution)
4:   if(fitness(solution)
> fitness(solution*)) then solution*
   = solution
5: end while
6: return solution*
```

شکل (۲): شبه کد الگوریتم GRASP

۴-۱. رویه Construct_Greedy_Randomized_Solution

برای ساخت جواب اولیه در هر تکرار از الگوریتم، متغیر $U_{wmhstt'}$ که در بخش قبل تعریف شده بود برای بیان تمامی تخصیص‌های ممکن بین حسگرها، سلاح‌ها، موشک‌ها، تهدیدها و زمان‌های شروع ردیابی و شلیک، مورد استفاده قرار خواهد گرفت. در ادامه گام‌های ساخت جواب شرح داده می‌شود.

گام ۱. مقداردهی به متغیرها با توجه به محدودیت‌های مرتبط با برد سلاح‌ها و زوایای پوشش سلاح‌ها و حسگرها در ابتدای الگوریتم هیچ‌کدام از متغیرها هنوز مقداری ندارند. در این گام از بین تمام متغیرهای $U_{wmhstt'}$ که $t \geq t' + dt_{sh}$

۴. الگوریتم GRASP

با توجه به نوع کاربرد مسئله این پژوهش، بدیهی است که حل مسئله باید در مدت زمان کوتاهی صورت پذیرد. در بخش اول توضیح داده شده که مسئله تخصیص سلاح به تهدید نوع خاصی از مسئله تخصیص حسگر-سلاح/تهدید است. زیرا در حالتی که فقط یک حسگر داشته باشیم، مانند این است که حسگر تأثیری در سود حاصل از تخصیص سلاح‌ها به تهدیدها ندارند. بنابراین، مسئله‌ای که در این تحقیق در حال بررسی آن هستیم حالت تعمیم‌یافته مسئله تخصیص سلاح به تهدید است. از طرفی همان‌طور که در پیشینه پژوهش توضیح داده شد در تحقیق لوید و ویتسنهاوزن در سال ۱۹۸۶ [۷] اثبات شده است که مسئله تخصیص سلاح به تهدید یک مسئله NP-Complete است. بنابراین با توجه به این توضیحات می‌توان گفت مسئله تحقیق حاضر که حالت تعمیم‌یافته مسئله تخصیص سلاح به تهدید است، نیز یک مسئله NP-Complete است که انتظار می‌رود با افزایش ابعاد مسئله زمان حل آن به‌صورت نمایی افزایش یابد. بنابراین حل مدل ارائه‌شده در بخش قبل توسط نرم‌افزارهای تحقیق در عملیات در ابعاد بزرگ به زمانی طولانی خواهد داشت. در نتیجه طراحی روشی مبتنی بر الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مسئله ضروری است. در این بخش به توسعه روش حلی بر مبنای الگوریتم‌های فراابتکاری تصادفی و تطابقی حریصانه (GRASP) برای حل مسئله حسگر-سلاح/تهدید به‌صورت یکپارچه، خواهیم پرداخت.

روش GRASP، یک الگوریتم فراابتکاری برای حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبیاتی است. این روش بر مبنای تکرارهای زیاد طراحی شده است که هر تکرار شامل دو فاز است. در فاز اول جوابی بر مبنای رویه ساخت تصادفی و تطابقی حریصانه ساخته می‌شود و در فاز دوم جواب ساخته‌شده به وسیله یک جستجوگر محلی بهبود داده می‌شود. در نهایت بهترین جواب در میان جواب‌های به‌دست آمده در تکرارها، به عنوان جواب نهایی، در نظر گرفته می‌شود [۳۰].

نحوه ساخت جواب اولیه در فاز اول هر تکرار که به روش نیمه حریصانه نیز مشهور است، اولین بار توسط هارت و شوگان، معرفی شد [۳۱]. الگوریتم GRASP نیز به‌صورت کامل اولین بار توسط فو و رزنده [۳۲]، معرفی شد. در ادامه نحوه کارکرد الگوریتم GRASP بیان می‌شود.

رویه ساخت جواب در فاز اول به این‌گونه است که ابتدا از میان تمام عناصری که می‌توانند به جواب مسئله اضافه شوند، تعدادی از عناصر برتر در لیستی تحت عنوان لیست کاندیدای محدود شده (RCL)، قرار داده می‌شوند. سپس از میان عناصر

بنابراین، گام دوم با تخصیص احتمال براساس معیار فوق به متغیرهای مقدار نگرفته و انتخاب یکی از این متغیرها بر حسب احتمالات محاسبه‌شده، به پایان می‌رسد. متغیر انتخاب‌شده در این گام را $U_{w^*m^*h^*s^*t^*t'^*}$ می‌نامیم و به آن مقدار یک تخصیص می‌دهیم.

گام ۳. به‌روز کردن مقدار متغیرهای مسأله

در این گام ابتدا با توجه به متغیری که در گام قبل برابر یک قرار داده شد، مقدار e_{h^*} به‌روز می‌شود و در صورتی که e_{h^*} برابر صفر شود. تمام متغیرهای تصمیمی که اندیس h^* دارند مقدار صفر می‌گیرند. نحوه به‌روز کردن e_{h^*} به‌صورت رابطه (۲۷) خواهد بود.

$$e_{h^*} = e_{h^*} + I_{w^*m^*h^*s^*t^*t'^*} \quad (27)$$

همچنین در ادامه این گام تمام متغیرهای تصمیمی که به‌علت یک شدن متغیر منتخب در گام قبل در سایر محدودیت‌های مسأله (محدودیت‌های مرتبط با ظرفیت حسگر و ...)، صدق نمی‌کنند، مقدار صفر می‌گیرند.

در انتهای گام سوم در صورتی که تمام متغیرهای مقدار نگرفته باشند، به گام دوم بازمی‌گردیم و درغیراین‌صورت رویه ساخت جواب اولیه پایان می‌یابد. شبه کد رویه ساخت جواب اولیه در شکل (۳) آورده شده است.

آنهایی که در محدودیت‌های مرتبط با برد سلاح‌ها و حسگرها و زوایای پوشش آنها صدق نمی‌کنند، مقدارشان را برابر با صفر قرار می‌دهیم.

گام ۲. انتخاب یکی از متغیرهایی که هنوز مقدار نگرفته‌اند از میان تمام متغیرهایی که هنوز مقدار نگرفته‌اند، باید یکی از آنها برای اضافه‌شدن به جواب مسأله (گرفتن مقدار یک) انتخاب شود. برای این کار، به تمام متغیرهای موجود احتمالی متناسب با معیار $I_{wmhstt'}$ در رابطه (۲۶) اختصاص می‌دهیم. احتمال انتخاب هرکدام از متغیرها که در این معیار مقدار بیشتری داشته باشند بیشتر خواهد بود.

$$e_{h^*} = b_h \min((1 - e_h), p_{sht} \pi_{wm} \times d_{wmh} \times (1 - 0.2 \times (\frac{dis_{wht} - r_{wm}^{\min}}{r_{wm}^{\max} - r_{wm}^{\min}})) \times \frac{3500}{l_h})) \quad (26)$$

در این معیار، عبارت $(1 - 0.2 \times (\frac{dis_{wht} - r_{wm}^{\min}}{r_{wm}^{\max} - r_{wm}^{\min}})) \times \frac{3500}{l_h}$ میزان تخریب تهدید h است هنگامی که متغیر $U_{wmhstt'}$ برابر یک شود، $(1 - e_h)$ میزان سلامتی باقیمانده از تهدید h است و b_h نیز میزان سود حاصل از تخریب تهدید h است. کل عبارت بالا میزان سود حاصل در صورتی که متغیر $U_{wmhstt'}$ برابر یک شود را بیان می‌کند.

Procedure Construct_Greedy_Randomized_Solution

- 1: $S \leftarrow$ all $U_{wmhstt'}$ variables ($w \in W, m \in M_w, h \in H, s \in S, t, t' \in T, t \geq t' + dt_{sh}$)
- 2: **while** ($S \neq \emptyset$)
- 3: Determine a probability for any $U_{wmhstt'}$ variables in S based on $I_{wmhstt'}$ values
- 4: $U_{w^*m^*h^*s^*t^*t'^*} \leftarrow$ choose a variable from S based on determined probabilities
- 5: Let $U_{w^*m^*h^*s^*t^*t'^*} = 1$
- 6: Let $e_{h^*} = e_{h^*} + I_{w^*m^*h^*s^*t^*t'^*}$
- 7: Update S
- 8: **end while**
- 9: **return solution**

شکل (۳): شبه کد ساخت جواب اولیه

مقدار قرار می‌دهیم. در نتیجه این کار به یک جواب ناقص^۱ می‌رسیم که ممکن است متغیرهای جدیدی بتوانند در آن مقدار یک بگیرند. حال با اعمال مجدد رویه ساخت جواب بر روی جواب جزئی، آن را کامل می‌کنیم تا هیچ متغیری که مقدار نگرفته باشد، باقی نماند. در صورتی که جواب به‌دست‌آمده بهبود یافته باشد، جواب جدید را به‌عنوان جواب نهایی آن تکرار از الگوریتم در نظر خواهیم گرفت. شبه کد روش جستجوی محلی در

۲-۴. رویه Local_Search

به منظور جستجوی همسایگی جواب ساخته‌شده در هر تکرار لازم است تا با استفاده از یک رویه مناسب برای جستجوی محلی، بهترین جواب موجود در همسایگی جواب ساخته‌شده را به‌دست آوریم.

در این تحقیق به منظور جستجوی محلی در همسایگی جواب ساخته شده، ابتدا ۸ درصد از تعداد متغیرهای یک شده در مرحله قبل را انتخاب می‌کنیم و سپس این متغیرها را بدون

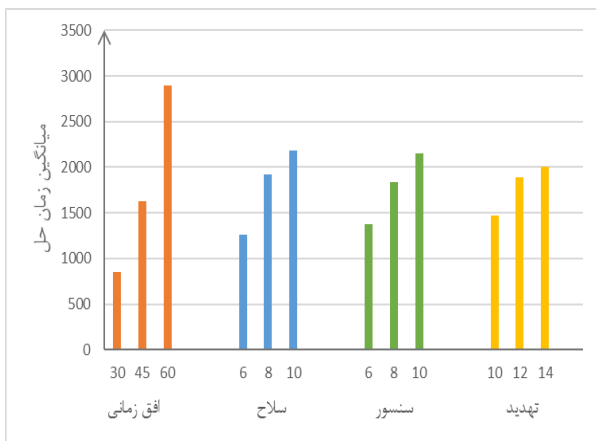
شکل (۴) آورده شده است. توجه شود که ϵ پارامتری است که برای حل مسأله باید تنظیم شود.

Procedure Local_Search (solution)

- 1: Choose $\epsilon\%$ of *solution* variables with values equal to one randomly
- 2: *PartialSolution* ← Remove values of chosen variables in *solution*
- 3: **update S**
- 4: *solution'* ← Construct_Greedy_Randomized_Solution(*PartialSolution*)
- 5: **if**(*fitness*(*solution'*) > *fitness*(*solution*)) **then**
 solution ← *solution'*
- 6: **return** (*solution*)

شکل (۴): رویه جستجوی محلی

ابتدا نتایج حاصل از حل نمونه مسائل ساخته شده با استفاده از مدل ریاضی ارائه شده در بخش سوم خواهیم پرداخت. این نمونه مسائل با کدنویسی مدل در محیط Visual Studio 2015 با زبان برنامه نویسی C و با استفاده از نرم افزار ILOG CPLEX 12.6.3 نسخه ۶۴ بیت حل شده اند و با در نظر گرفتن چهار حد زمانی ۳۶۰۰، ۱۸۰۰، ۶۰۰ و ۶۰ ثانیه انجام شده است. در شکل (۵) سه نمودار به ازای چهار پارامتر اصلی مسأله آورده شده است که نشان دهنده میانگین زمان حل نمونه مسائل به ازای سطوح مختلف این پارامترها است. همان طور که مشاهده می شود در هر چهار پارامتر با افزایش سطح، میانگین زمان حل نیز افزایش می یابد. این شکل نشان می دهد که با تغییر پارامتر افق زمانی بیشترین افزایش در زمان حل مسأله اتفاق می افتد.



شکل (۵): میانگین زمان حل نمونه مسائل به ازای سطوح مختلف پارامترهای مسأله

در نمودار شکل (۶) درصد نمونه مسائلی که با حد زمانی حل ۳۶۰۰ ثانیه به جواب بهینه رسیده اند آورده شده است.

۵. نتایج محاسباتی

در این بخش به تشریح نتایج حل مسأله خواهیم پرداخت. لازم به ذکر است، کلیه محاسباتی که در این فصل نتایج آن گزارش شده است، بر روی یک سامانه با مشخصات CPU Core i7 3.40GHz، 48 GB RAM که دارای سامانه عامل ویندوز ۱۰ نسخه ۶۴ بیتی بود است، اجرا شده است.

۵-۱. نحوه ساخت نمونه مسائل

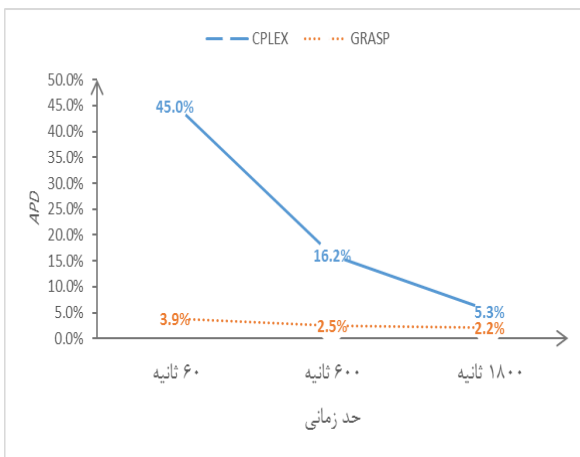
برای ساخت نمونه مسائل مختلف سطوح مختلفی برای اندازه مجموعه سلاحها (W)، حسگرها (S)، تهدیدها (H) و افق زمانی مسأله (T) در نظر گرفته شده است. سطوح در نظر گرفته شده برای این پارامترها در جدول (۱) آورده شده است. با توجه به جدول برای هر پارامتر ذکر شده ۳ سطح در نظر گرفته شده است که منجر به ایجاد ۸۱ دسته نمونه مسأله خواهد شد. در هر دسته نیز ۵ نمونه مسأله ساخته شده است که در مجموع ۴۰۵ نمونه مسأله ساخته شده است.

جدول (۱): سطوح پارامترهای نمونه مسائل

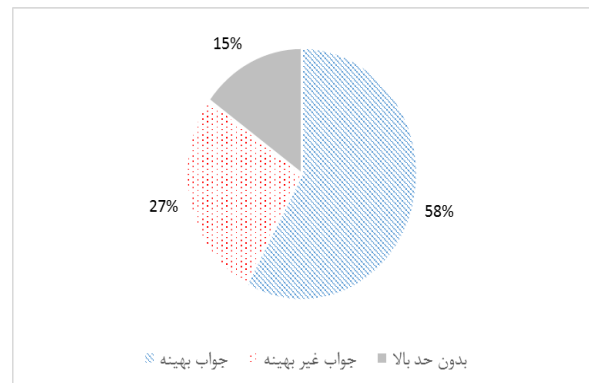
پارامتر	مقادیر
تعداد سلاح ($ W $)	۶-۸-۱۰
تعداد حسگر ($ S $)	۶-۸-۱۰
تعداد تهدید ($ H $)	۱۰-۱۲-۱۴
افق زمانی ($ T $)	۳۰-۴۵-۶۰
تعداد موشک های هر سلاح ($ M_w $)	به صورت تصادفی بین ۱ تا ۴
تعداد نمونه مسأله در هر دسته	۵

توجه شود که در نمونه مسائل مختلف برای اندازه مجموعه تعداد موشک های هر سلاح (M_w) نیز مقدار تصادفی بین ۱ تا ۴ در نظر گرفته شده است.

با وجود اینکه مطابق شکل (۷) به صورت میانگین الگوریتم GRASP نتایج بهتری داشته است، اما اگر شاخص APD را در نمونه مسائل با اندازه‌های مختلف بین دو روش مقایسه نماییم، در مسائل با اندازه‌های کوچکتر و در حدود زمانی بالاتر حل دقیق جواب‌های با کیفیت‌تری ارائه نموده است. در شکل (۸) مقایسه میانگین شاخص APD در سه سطح پارامتر افق زمانی (۳۰، ۴۵ و ۶۰ واحد زمانی) و در حدود زمانی ۶۰، ۶۰۰ و ۱۸۰۰ ثانیه انجام شده است. مطابق این شکل در افق زمانی با سطح ۳۰ واحد و در حد زمانی ۱۸۰۰ و ۶۰۰ ثانیه میانگین شاخص APD برای حل دقیق کمتر بوده است. در ادامه و در شکل‌های (۹)، (۱۰) و (۱۱) به صورت مشابه این مقایسه در پارامترهای تعداد تهدید، سلاح و حسگر نیز انجام شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تمامی این پارامترها، در حد زمانی ۱۸۰۰ ثانیه و در پایین‌ترین سطح هر پارامتر حل دقیق نتایج باکیفیت‌تری داشته است.



شکل (۷): مقایسه میانگین شاخص APD روش دقیق و فراابتکاری در حدود زمانی مختلف

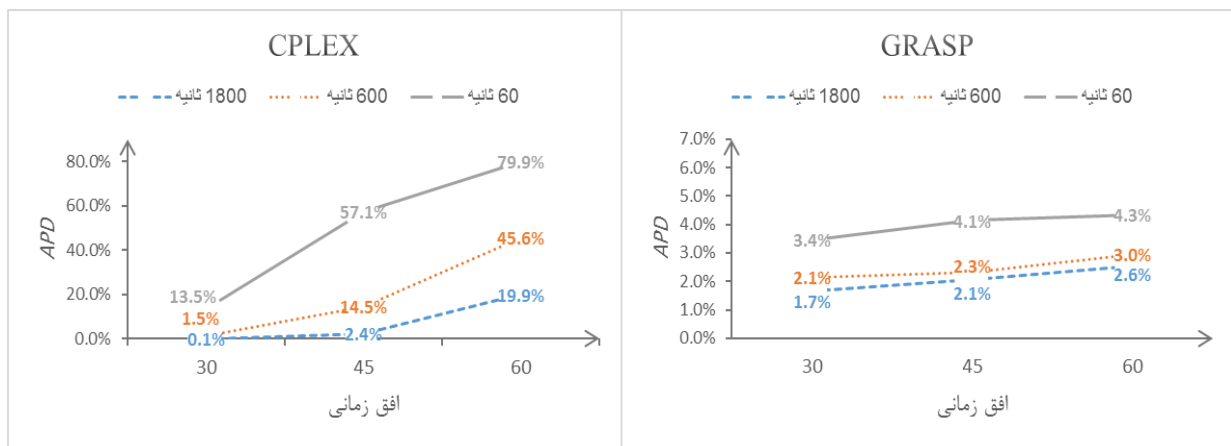


شکل (۶): درصد نمونه مسائلی که با محدودیت زمان حل ۳۶۰۰ ثانیه به جواب بهینه رسیده‌اند

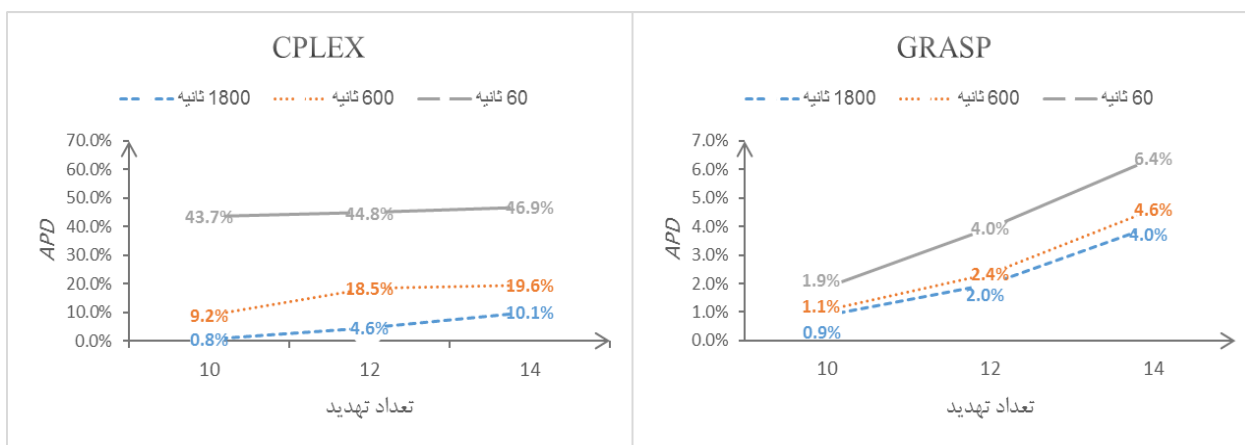
در ادامه برای مقایسه نتایج روش دقیق و روش فراابتکاری از شاخص APD استفاده شده است که نشان‌دهنده درصد اختلاف بهترین جواب پیدا شده نمونه مسائل یک دسته که با الگوریتم GRASP یا با روش دقیق در حدود زمانی ۱۸۰۰، ۶۰۰ یا ۶۰ ثانیه حل شده‌اند نسبت به بهترین جواب پیدا شده در حد زمانی ۳۶۰۰ ثانیه با روش دقیق می‌باشد. در رابطه (۲۸) نحوه محاسبه این شاخص برای مقایسه جواب حاصل از حل دقیق در حد زمانی ۱۸۰۰ ثانیه با بهترین جواب حاصل از روش دقیق که در حد زمانی ۳۶۰۰ ثانیه به دست آمده است، نشان می‌دهد.

$$APD = \frac{\sum_{\text{نمونه مسائل یک دسته}} \left(\frac{\text{جواب 1800 ثانیه} - \text{جواب 3600 ثانیه}}{\text{جواب 3600 ثانیه}} \times 100 \right)}{5} \quad (28)$$

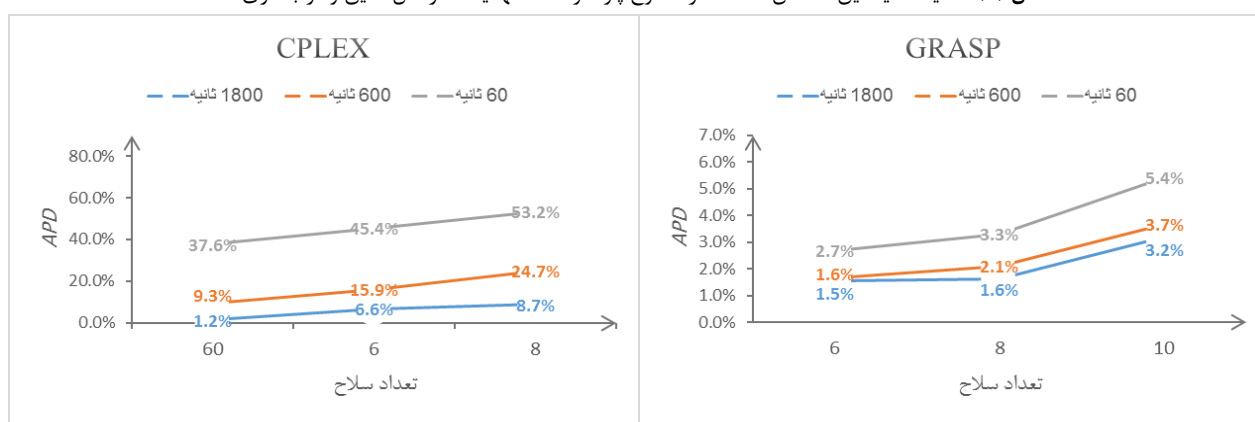
نمودار شکل (۷) نشان‌دهنده میانگین شاخص APD در حدود زمانی ۶۰، ۶۰۰ و ۱۸۰۰ ثانیه در دو روش دقیق و فراابتکاری می‌باشد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، الگوریتم GRASP در هر سه حد زمانی، به صورت میانگین جواب‌های با کیفیت‌تری را ارائه کرده است.



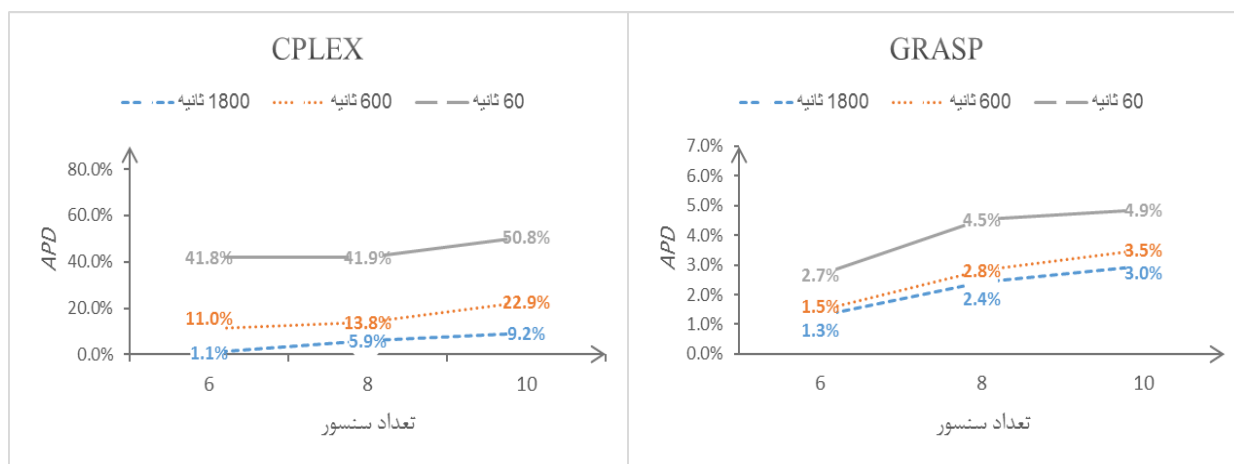
شکل (۸): مقایسه میانگین شاخص APD در سطوح پارامتر افق زمانی در حل دقیق و فراابتکاری



شکل (۹): مقایسه میانگین شاخص APD در سطوح پارامتر تعداد تهدیدها در حل دقیق و فراابتکاری



شکل (۱۰): مقایسه میانگین شاخص APD در سطوح پارامتر تعداد سلاحها در حل دقیق و فراابتکاری



شکل (۱۱): مقایسه میانگین شاخص APD در سطوح پارامتر تعداد حسگرها در حل دقیق و فراابتکاری

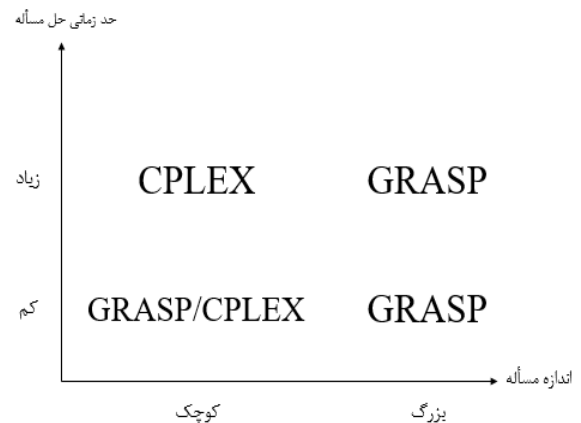
می‌توان در شکل (۱۲) به صورت خلاصه مشاهده کرد.

کلیه تحلیل‌هایی که برای مقایسه دو روش انجام شد را

در این مثال عددی، مقادیر ۴، ۲ و ۳ به ترتیب برای تعداد سلاح، حسگر و تهدید انتخاب شده‌اند. همچنین تمام سلاح‌ها دارای ۲ موشک می‌باشند. افق زمانی نبرد نیز ۱۰ واحد زمانی (ثانیه) در نظر گرفته شده است. تمام مقادیر زمان ردیابی برای هر جفت حسگر و تهدید (dt_{sh}) برابر ۱ ثانیه در نظر گرفته شده است. همچنین تمامی مقادیر p_{sht} برای تمامی حسگرها، تهدیدها و زمان‌ها برابر ۰/۹ در نظر گرفته شده است. تمامی مقادیر d_{wmh} و π_{wm} نیز برابر ۰/۹۵ فرض شده‌اند. زمان‌های شلیک (ft_w) و زمان‌های آماده‌سازی سلاح‌ها (st_w) تماماً برابر با صفر در نظر گرفته شده‌اند. هر کدام از حسگرها در هر لحظه حداکثر می‌توانند ۱ تهدید را ردیابی کنند و هر تهدید در هر لحظه حداکثر توسط ۲ حسگر می‌تواند ردیابی شود. موقعیت سلاح‌ها، حسگرها و تهدیدها در منطقه تنگه هرمز در نظر گرفته شده و در شکل (۱۳) مشخص شده است. تهدیدها در این مثال متحرک هستند که در جهات نشان داده شده در شکل در حرکت می‌باشند. اهمیت تهدید ۱ برابر ۰/۵۹، تهدید ۲ برابر ۰/۷۳ و تهدید ۳ برابر ۰/۵ می‌باشد.

بعد از حل این مثال مشخص شد که حسگر شماره ۱ تهدیدهای شماره ۳ را در زمان ۶ برای استفاده سلاح شماره ۱، مورد ردیابی قرار می‌دهد و سلاح ۱ نیز این تهدید را با موشک‌های ۱ و ۲ خود در زمان‌های ۷ و ۸ مورد هدف قرار می‌دهد. همچنین حسگر شماره ۱ در زمان ۸ شروع به ردیابی تهدید ۱ خواهد کرد که با استفاده از اطلاعات ارسالی این حسگر سلاح‌های شماره ۲ و ۴ هر دو به‌صورت هم‌زمان در زمان ۹ هر کدام با یک موشک به تهدید شماره ۱ شلیک خواهند کرد. حسگر ۲ نیز در زمان ۱ شروع به ردیابی تهدید ۲ می‌کند که این تهدید در زمان ۸ توسط سلاح ۳ و ۴ هر کدام با یک موشک مورد شلیک قرار خواهد گرفت. در شکل (۱۴) اتفاقات رخ داده در افق زمانی این مثال آورده شده است.

علاوه بر حل دقیق، این مثال با روش GRASP نیز حل شد که نتایج آن مشابه حل دقیق به‌دست آمد.



شکل (۱۲): روش مناسب برای حل مسأله با توجه به اندازه مسأله و حد زمانی حل مسأله

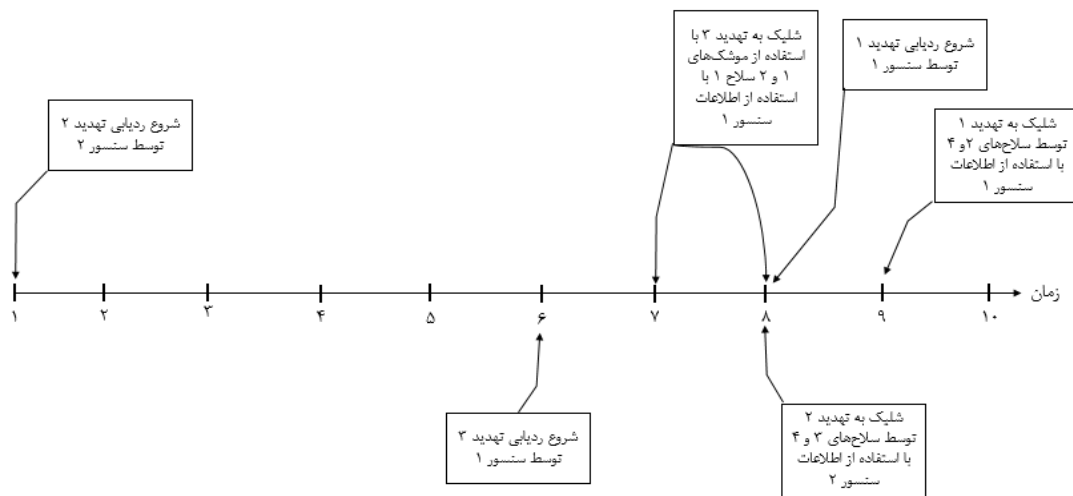
مطابق با شکل (۱۲) در مسأله با اندازه کوچک و با حد زمانی بالا حل دقیق نتایج بهتری خواهد داشت. در حالتی که اندازه مسأله کوچک و زمان حل کم است مطابق با نتایجی که در این بخش ارائه شد، روش GRASP نتایج بهتری داشته است. اما این در حالی است که نمونه مسائلی که در این فصل به بررسی آنها پرداخته شد حتی در اندازه‌های کوچک نیز، مطابق نمونه مسائل واقعی بوده‌اند و به همین دلیل نتایج حل دقیق، ضعیف‌تر بوده است. در نمونه مسائل با اندازه خیلی کمتر که در این تحقیق بررسی نشده‌اند حل دقیق در مدت زمان کوتاه نیز جواب‌های با کیفیت بالا و در اکثر موارد جواب بهینه ارائه می‌دهد، بنابراین برای نمونه مسائل خیلی کوچک‌تر حل دقیق نیز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

۶. مثال عددی

با توجه به این که مسأله تخصیص و زمانبندی حسگر-سلاح/تهدید به‌صورت یکپارچه که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت، دارای کاربرد خاص است، در این بخش به بیان یک مثال موردی از این مسأله و نتایج حل آن خواهیم پرداخت.



شکل (۱۳): موقعیت سلاح‌ها، حسگرها و تهدیدها بر روی نقشه



شکل (۱۴): اتفاقات رخ داده در صحنه نبرد مثال عددی

۷. نتیجه گیری

در این تحقیق مسأله تخصیص و زمان بندی حسگر-سلاح/تهدید به صورت یکپارچه مورد بحث و بررسی قرار داده شد. همان طور که بیان شده بود، مسأله تخصیص حسگر، سلاح و تهدید دارای دو نوع غیر وابسته و وابسته به حسگر است. در نوع غیر وابسته نحوه تخصیص حسگر تأثیری در سود حاصل از تخصیص سلاح‌ها به تهدیدها ندارند. اما در نوع وابسته آن با تغییر حسگر ردیابی کننده یک تهدید سود حاصل از تخصیص سلاح‌ها به آن تهدید تغییر خواهد کرد. نوع وابسته که دارای پیشینه پژوهشی بیشتری است، تاکنون در شرایط مختلف در پژوهش‌های گذشته مورد بحث قرار گرفته است. اما در نوع غیر وابسته که حالت کلی تری به شمار می‌رود سابقه پژوهشی کمی وجود داشته و در اکثر پژوهش‌های قبلی مسأله به صورت ساده و بدون در نظر گرفتن محدودیت‌هایی که در عمل اتفاق می‌افتد، مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در پژوهش‌های قبلی نحوه تأثیرگذاری حسگرها در مسأله تخصیص به صورت از پیش تعیین شده در نظر گرفته شده است. همچنین در اکثر تحقیقات گذشته مسأله زمان بندی ردیابی و شلیک تهدیدها و اینکه ممکن است اجزای مسأله متحرک یا ثابت باشند در نظر گرفته نشده است. در این تحقیق سعی شده تمامی موارد ذکر شده در مدل سازی و حل مسأله در نظر گرفته شود و تا حد ممکن مدل سازی نزدیک به دنیای واقعی انجام شود. روش GRASP ارائه شده برای حل مسأله مطابق با نتایج ارائه شده در بخش ۵ دارای سرعت بالا و دقت قابل قبولی است. همچنین مطابق با مقایسه روش فراابتکاری و حل دقیق مسأله در بخش پنجم، نتیجه گیری می‌شود که در حد زمانی کوتاه روش GRASP جواب‌های نزدیک تری به جواب بهینه نسبت به حل دقیق در همان حد

زمانی ارائه می‌دهد اما با افزایش حد زمانی و در مسائل با ابعاد کوچک حل دقیق جواب‌های با کیفیت تری را ارائه خواهد داد. برای تحقیقات آتی می‌توان، بحث استواری جواب مسأله نسبت به تغییر پارامترهای مختلف مسأله مورد بررسی قرار گیرد.

۸. مراجع

- [1] N. Li, W. Huai, and S. Wang, "The solution of target assignment problem in command and control decision-making behaviour simulation," *Enterprise Information Systems*, vol. 11, pp. 1059-1077, 2017.
- [2] Z. Bogdanowicz, and N. Coleman, "Advanced Algorithm for Optimal Sensor-Target and Weapon-Target Pairings in Dynamic Collaborative Engagement," *Army Armament Research Development and Engineering Center Picatinny Arsenal NJ2008*.
- [3] Z. R. Bogdanowicz, "A new efficient algorithm for optimal assignment of smart weapons to targets," *Computers & Mathematics with Applications*, vol. 58, pp. 1965-1969, 2009.
- [4] S. Matlin, "A review of the literature on the missile-allocation problem," *Operations Research*, vol. 18, pp. 334-373, 1970.
- [5] R. K. Ahuja, A. Kumar, K. C. Jha, and J. B. Orlin, "Exact and heuristic algorithms for the weapon-target assignment problem," *Operations Research*, vol. 55, pp. 1136-1146, 2007.
- [6] P. A. Hosein, J. T. Walton, and M. Athans, "Dynamic weapon-target assignment problems with vulnerable $C2I^3$ nodes," 1988.
- [7] S. P. Lloyd and H. S. Witsenhausen, "Weapons allocation is NP-complete," in *1986 Summer Computer Simulation Conference*, 1986, pp. 1054-1058.
- [8] Y.H. Cha and Y.D. Kim, "Fire scheduling for planned artillery attack operations under time-dependent

- [21] S. A. KhatoonAbadi, H. Shirazi, "Weapon Target Assignmnet using Distributed Constraint Optimization," in 7th National Command and Control Conference, Tehran, 2013 (In Persian).
- [22] H. Almasian, A. Shakibamanesh, "littoral and floating Missile sites Layout for The Assignment of Weapons Against Offshore Sea Targets," in 8th National Command and Control Conference, Tehran, 2014 (In Persian).
- [23] A. Okhravi, A. Pooya, S. Nazemi, M. Kazemi, "Designing an integrated model for assigning targets to headquarters in marine battle management regarding to target classification," Ph.D Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Khorasan Razavi, Iran, 2016 (In Persian).
- [24] F. Feiznaei, M. B. Naghibisistani, S. K. Hosseinisani, "Solving the problem of weapons allocation in defense systems," M.S. Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Kharasan Razavi, Iran, 2015 (In Persian).
- [25] Z. Bogdanowicz and N. Coleman, "Sensor-target and weapon-target pairings based on auction algorithm," in Proceedings of the 11th WSEAS International Conference on APPLIED MATHEMATICS, 2007, pp. 92-96.
- [26] L. Zi-fen, L. Xiang-min, D. Jin-jin, C. Jin-zhu, and Z. Feng-xia, "Sensor-weapon-target assignment based on improved SWT-opt algorithm," in Computing, Control and Industrial Engineering (CCIE), 2011 IEEE 2nd International Conference, 2011, pp. 25-28.
- [27] H. Chen, Z. Liu, Y. Sun, and Y. Li, "Particle swarm optimization based on genetic operators for sensor-weapon-target assignment," in Computational Intelligence and Design (ISCID), 2012 Fifth International Symposium on, 2012, pp. 170-173.
- [28] K. L. Ezra, D. A. DeLaurentis, L. Mockus, and J. F. Pekny, "Developing Mathematical Formulations for the Integrated Problem of Sensors, Weapons, and Targets," Journal of Aerospace Information Systems, 2016.
- [29] L. Mu, X. Qu, and P. Wang, "Application of Sensor/Weapon-Target Assignment based on Multi-Scale Quantum Harmonic Oscillator Algorithm," in Image, Vision and Computing (ICIVC), 2017 2nd International Conference on, 2017, pp. 1147-1151.
- [30] T. A. Feo and M. G. Resende, "Greedy randomized adaptive search procedures," Journal of global optimization, vol. 6, pp. 109-133, 1995.
- [31] J. P. Hart and A. W. Shogan, "Semi-greedy heuristics: An empirical study," Operations Research Letters, vol. 6, pp. 107-114, 1987.
- [32] T. A. Feo and M. G. Resende, "A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem," Operations research letters, vol. 8, pp. 67-71, 1989.
- destruction probabilities," Omega, vol. 38, pp. 383-392, 2010.
- [9] D. Lötter, I. Nieuwoudt, and J. Van Vuuren, "A multiobjective approach towards weapon assignment in a ground-based air defence environment," ORiON, vol. 29, pp. 31-54, 2013.
- [10] O. Karasakal, "Optimal Air Defense Strategies for Naval Task Group," METU, 2004.
- [11] T. Gülez, "Weapon-Target Allocation And Scheduling For Air Defense With Time Varying Hit Probabilities," Middle East Technical University, 2007.
- [12] G. Cho, "Hybrid nested partition method with intelligent greedy search for solving Weapon Target Assignment problem," Iowa State University, 2009.
- [13] A. Turan, "Algorithms for the weapon-target allocation problem," PhD diss., Middle East Technical University, 2012.
- [14] K. Kalyanam, S. Rathinam, D. Casbeer, and M. Pachter, "Optimal Threshold Policy for Sequential Weapon Target Assignment," IFAC-PapersOnLine, vol. 49, pp. 7-10, 2016.
- [15] Z. Mei, Z. Peng, and X. Zhang, "Optimal dynamic weapon-target assignment based on receding horizon control heuristic," in Control & Automation (ICCA), 2017 13th IEEE International Conference, 2017, pp. 876-881.
- [16] Y.z. Chang, Z.w. Li, Y.x. Kou, Q.p. Sun, H.y. Yang, and Z.y. Zhao, "A New Approach to Weapon-Target Assignment in Cooperative Air Combat," Mathematical Problems in Engineering, vol. 2017, 2017.
- [17] Y. Li, Y. Kou, Z. Li, A. Xu, and Y. Chang, "A Modified Pareto Ant Colony Optimization Approach to Solve Biobjective Weapon-Target Assignment Problem," International Journal of Aerospace Engineering, vol. 2017, 2017.
- [18] R. taghavi, M. Ranjbar, "Weapon Scheduling in Naval Combat Systems for Maximization of Defense Capabilities," Iranian Journal of Operations Research, vol. 6, 2015.
- [19] M. Peymankar, M. Ranjbar, A. Izadipour, S. Balochian, "Modelling and Solving the Location Problem of Fire Launching Sites," Journal of Electronical & Cyber Defence, vol 6, no.3, Serial No. 23, 2017 (In Persian).
- [20] M. Peymankar, M. Ranjbar, A. Izadipour, S. Balochian, "Modeling and Solution of Fire Allocation and Scheduling Problem of Distributed Sites," Journal of Advanced Defence Science and Technology, vol 9, no 4, Serial No 34, 2018 (In Persian).

**Modelling and Optimal Solving of Dependent Sensor-Weapon/Threat
Assignment and Scheduling Problem by a Metaheuristic Algorithm Based on GRASP**

R. Ghorbani Saber, M. Ranjbar*, S. Balochian, A. Izadipour

*Department of Industrial Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

(Received: 50/09/2018, Accepted: 18/06/2019)

ABSTRACT

Nowadays, smart systems are being widely used in combats because there exist a lot of applications for these systems which usually depend on sensors. Matching sensors to weapons and threats or in short sensor-weapon/threat assignment is a major challenge in modern wars and is classified as a complex resource assignment optimization problem. Consequently, the result of modern wars highly depends on effective usage of sensors and weapons. In this paper, the sensor-weapon/threat assignments and their scheduling problem have been formulated. The object of this model is maximizing the destruction of threats in a given time horizon subject to operational constraints. This model has been solved using CPLEX. Furthermore, a metaheuristic algorithm based on GRASP is developed. Finally, using a set of randomly generated test instances, the results of all developed solution approaches are reported and compared.

Keywords: Resource Assignment, Scheduling, Assignment and Scheduling Sensor-Weapon/Threat

* Corresponding Author Email: m_ranjbar@um.ac.ir